

А.Н. Шадрин

ДИСПЕРСИОННЫЙ МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЗЕНИТНОГО УГЛА ДВИЖУЩЕГОСЯ В АТМОСФЕРЕ ОБЪЕКТА

Рассмотрен дисперсионный метод, позволяющий оценить зенитный угол движущегося в атмосфере объекта, основанный на измерении видимых зенитных углов на двух длинах волн оптического излучения и метеопараметров в точке наблюдения. Проведен выбор пар длин волн излучения, дана оценка погрешности предложенного метода.

Оптическая рефракция в земной атмосфере, проявляющаяся в искривлении траектории лучей, затрудняет определение истинного положения движущегося объекта. Для учета влияния рефракции необходимо знать высотный профиль показателя преломления воздуха вдоль трассы распространения излучения, что возможно либо путем оперативного измерения, либо путем использования различных моделей атмосферы.

Реализация оперативного измерения высотного профиля показателя преломления воздуха представляет значительные технические трудности, особенно для объектов, движущихся по наклонным трассам и неизвестной траектории. Альтернативным подходом можно считать применение методов учета рефракции, в основе которых лежит использование статистических моделей атмосферы.

Методы учета, основанные на статистических моделях атмосферы, используются крайне редко вследствие значительных погрешностей и необходимости применения ЭВМ с большой оперативной памятью. Методы, использующие аналитические модели, свободны от последнего недостатка, однако и они имеют значительные погрешности расчета, особенно на больших зенитных углах ($z > 75^\circ$), обусловленные отличием реальных высотных профилей показателя преломления воздуха от принятых в моделях.

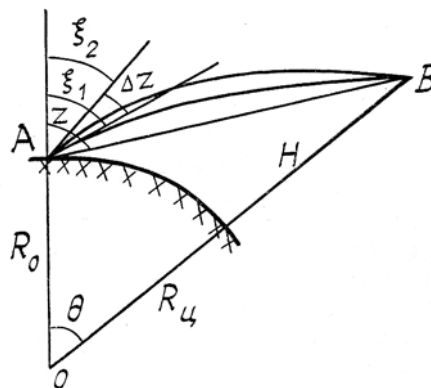


Рис. 1

Снизить погрешность определения истинного зенитного угла позволяет дисперсионный метод, в основе которого лежит зависимость углов прихода от спектра излучения. Рассмотрим схему на рис. 1, где обозначены ξ_1, ξ_2 — видимые зенитные углы лоцируемого объекта на длинах волн излучения λ_1 и λ_2 соответственно; Δr — угол разностной рефракции; z — истинный зенитный угол; R_0 — радиус Земли; $R_u = R_0 + H$; H — высота объекта над уровнем моря.

Из рис. 1 видно, что геоцентрический угол (θ) не зависит от длины волны излучения, на которой происходит лоцирование объекта, поэтому на основании теории рефракции для сферически-слоистой среды можно записать [1]

$$\theta = A_{01} \int_{R_0}^{R_u} \frac{dR}{R \sqrt{R^2 n_1^2 - A_{01}^2}} = A_{02} \int_{R_0}^{R_u} \frac{dR}{R \sqrt{R^2 n_2^2 - A_{02}^2}}, \tag{1}$$

где $A_{01} = n_{01} R_0 \sin \xi_1$; $A_{02} = n_{02} R_0 \sin \xi_2$; n_{01}, n_{02} — показатели преломления воздуха в точке наблюдения для излучений на длинах волн λ_1 и λ_2 соответственно; n_1, n_2 — показатели преломления воздуха в текущей точке траектории лучей на соответствующих длинах волн.

При условии непрерывности изменения показателя преломления воздуха по траектории луча его можно заменить на среднеинтегральное значение, тогда решение выражения (1) согласно [2] будет иметь вид

$$\theta = \arccos \frac{A_{01}}{R_u \langle n_1 \rangle} - \arccos \frac{A_{01}}{R_0 \langle n_1 \rangle} = \arccos \frac{A_{02}}{R_u \langle n_2 \rangle} - \arccos \frac{A_{02}}{R_0 \langle n_2 \rangle}. \quad (2)$$

Используя формулы преобразования обратных тригонометрических функций [2] и обозначив

$$A = \frac{n_{01} \sin \xi_1}{\langle n_1 \rangle}, \quad B = \frac{n_{02} \sin \xi_2}{\langle n_2 \rangle}, \quad G = \frac{R_0}{R_0 + H},$$

после несложных алгебраических преобразований выражения (2), получим

$$(A^2 - B^2)^2 (1 - G^2)^2 = 0. \quad (3)$$

Анализ выражения (3) показывает, что для сохранения равенства в нуль может обращаться только первый сомножитель, так как для наклонных трасс $G < 1$, что приводит к равенству

$$\frac{n_{01} \sin \xi_1}{\langle n_1 \rangle} = \frac{n_{02} \sin \xi_2}{\langle n_2 \rangle}. \quad (4)$$

Подставляя в выражение (4) формулу Гладстона—Даля для показателя преломления воздуха, после несложных алгебраических преобразований получим выражение, позволяющее оценить среднеинтегральный показатель преломления воздуха на длине волны

$$\langle n \rangle = \frac{(C_{\lambda_2} - C_{\lambda_1}) n_{01} \sin \xi_1}{C_{\lambda_2} n_{01} \sin \xi_1 - C_{\lambda_1} n_{02} \sin \xi_2}, \quad (5)$$

где C_{λ_1} , C_{λ_2} — коэффициенты, зависящие от длины волны излучения.

Из треугольника АОВ (рис. 1) по теореме синусов получим выражение для геоцентрического угла

$$\theta = z - \arcsin(G \sin z),$$

подставив которое вместо правой части в соотношение (2) и решая его относительно $\sin z$ путем двукратного возведения в квадрат и приведения подобных членов, получим

$$(\sin^2 z - A^2)^2 (1 - G^2)^2 = 0. \quad (6)$$

Анализ соотношения (6) показывает, что равенство будет справедливо при обращении в нуль первого сомножителя, следовательно,

$$\sin z = (n_{01} \sin \xi_1) / \langle n_1 \rangle$$

или

$$z = \arcsin \frac{C_{\lambda_2} n_{01} \sin \xi_1 - C_{\lambda_1} n_{02} \sin \xi_2}{C_{\lambda_2} - C_{\lambda_1}}. \quad (7)$$

Таким образом, исходя из теории рефракции для сферически-слоистой атмосферы, в предположении, что лоцирование ведется двухчастотным оптическим излучением, получено выражение, позволяющее оценить истинный зенитный угол движущегося в атмосфере объекта. Как видно из выражения (7), для вычисления величины истинного зенитного угла необходимо измерять показатели преломления воздуха в точке наблюдения (или метеопараметры) и видимые зенитные углы для излучений на соответствующих длинах волн.

Необходимо отметить, что измерение видимых зенитных углов можно проводить как активными методами, так и пассивными — в виде локации, при которой необходимо из оптического сигнала выделять, например, с помощью фильтров, излучение на двух длинах волн.

Очевидно, что в случае, когда излучение на одной длине волны будет лежать в инфракрасном диапазоне, а другое — в ультрафиолетовом, то величина угла разностной рефракции будет наибольшей. Однако значительное ослабление излучения ультрафиолетового диапазона не дает использовать его на больших зенитных углах. В то же время использование излучений на двух длинах волн, близких друг к другу, инфракрасного диапазона в ряде случаев приводит к невозможности измерения угла разностной рефракции, поэтому возникает необходимость подбора пар длин волн излучений.

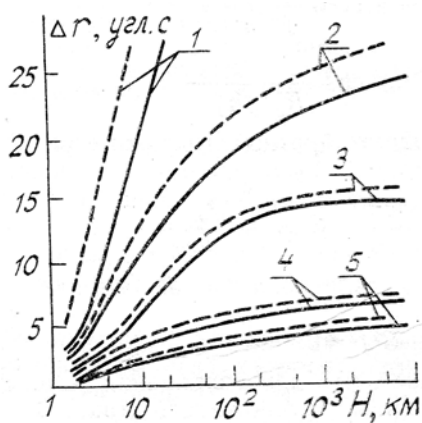


Рис. 2

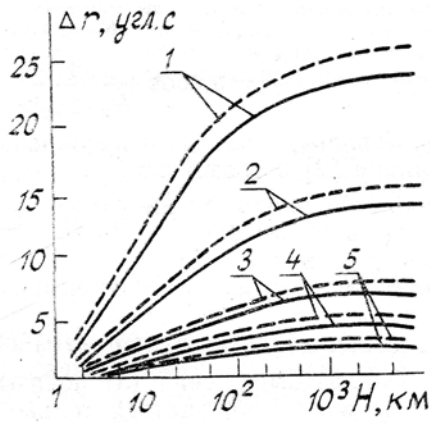


Рис. 3

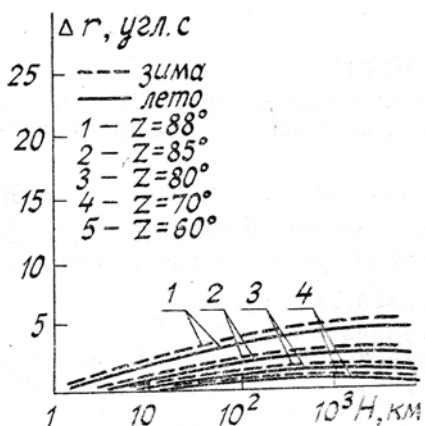


Рис. 4

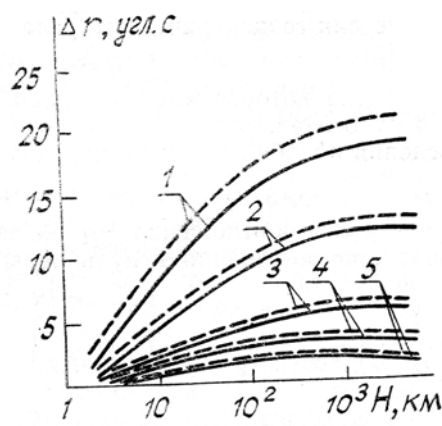


Рис. 5

С этой целью для нескольких пар длин волн с использованием данных модели местной атмосферы были рассчитаны углы разностной рефракции в зависимости от высоты и зенитного угла объекта. Результаты расчета приведены на рис. 2–5. Из графиков видно, что наибольшие значения углов разностной рефракции во всем диапазоне высот и зенитных углов наблюдаются при использовании излучений на длинах волн $\lambda_1 = 0,6943$ мкм и $\lambda_2 = 0,3472$ мкм (рис. 2). Однако для практического использования данная пара длин волн будет иметь ограничения, связанные со значительным ослаблением излучения на λ_2 при зенитных углах $z > 75^\circ$.

На рис. 3, 4 представлены зависимости углов разностной рефракции от зенитных углов и высот нахождения объекта для пар длин волн $\lambda_1 = 0,4416$ мкм, $\lambda_2 = 0,3472$ и $\lambda_1 = 1,06$ мкм, $\lambda_2 = 0,84$ мкм соответственно. Из графиков видно, что, несмотря на значительную крутизну, первая пара длин волн практически применяться не может вследствие поглощения излучений атмосферой (рис. 6). Вторая пара, лежащая в ближнем инфракрасном диапазоне, меньше поглощается атмосферой, однако величина угла разностной рефракции даже при зенитных углах, больших 75° , не превышает единиц угловых секунд, что предъявляет жесткие требования к измерителю, которые на практике осуществить сложно. Наиболее оптимальной парой длин волн можно считать $\lambda_1 = 0,6943$ мкм, $\lambda_2 = 0,4416$ мкм (рис. 5), так как зависимость угла, разностной рефракции имеет значительную крутизну, а ослабление атмосферой не столь велико.

Таким образом, из графиков видно, что наиболее приемлемые пары излучений на длинах волн $\lambda_1 = 0,6943$ мкм и $\lambda_2 = 0,3472$ при лоцировании объектов на зенитных углах $z < 60^\circ$, а при больших углах более целесообразно использовать пару $\lambda_1 = 0,6943$ мкм и $\lambda_2 = 0,4416$ мкм.

Для оценки точности предложенного метода были получены соотношения, анализ которых показал, что наибольший вклад в погрешность расчета вносит ошибка измерения зенитного угла и разностной рефракции. Анализ потенциальной точности проводился при следующих исходных данных: видимые зенитные углы изменялись от 20 до 89° , высота объекта от 2 до 1000 км, давление и температура в точке наблюдения соответственно равны $976,24$ мб и $263,69$ К, а точность их измерения соответственно составляла $0,1$ Мб и $0,1$ К.

Полученные результаты приведены на рис. 7, из которого видно, что погрешность определения истинного зенитного угла соизмерима со среднеквадратической ошибкой определения угла рефракции, полученной по результатам аэрологического зондирования. Необходимо также отметить, что

предложенный метод позволяет существенно уменьшить влияние турбулентности атмосферы, так как измерение видимых зенитных углов проводят за время «замороженности» атмосферы.

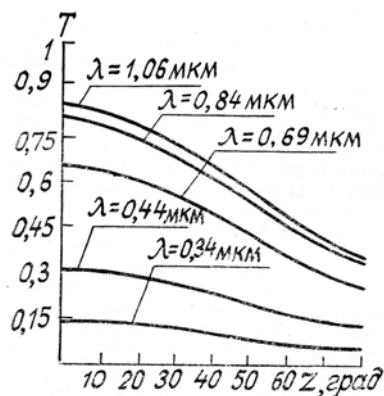


Рис. 6

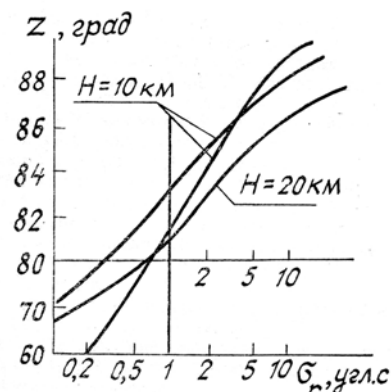


Рис. 7

Это обстоятельство позволяет оценивать истинное направление на объект в реальном масштабе времени и, следовательно, учитывать неоднородности, возникающие на трассе распространения излучения.

1. Аксенов В. П., Алексеев А. В., Банах В. А. и др. Влияние атмосферы на распространение лазерного излучения. Томск: ИОА СО АН СССР, 1987.
2. Бронштейн И. Н., Семендяев К. А. Справочник по математике. М.: Наука, 1986.
3. Нелюбин Н. Ф. Сравнительная точность некоторых методов учета рефракции на наклонных трассах // Астрометрия и астрофизика. 1983. Вып. 50. С. 66–75.

Поступила в редакцию
27 июня 1991 г.

A. N. Shadrin. **Dispersion Technique for Determining the Elevation Angle of an Object Moving in the Atmosphere.**

A dispersion technique for estimating the elevation angle of an object moving in the atmosphere, which is based on measurements of apparent elevation angles at two wavelengths and uses data on meteorological parameters at the observation point is discussed. The choice of a pair of radiation wavelengths is made and the errors of the technique are estimated.